

論文 石灰岩砕石を粗骨材として使用した高強度鉄筋コンクリート造柱の耐火性に関する検討

森田 武*1・西田 朗*2・片山 行雄*3・菅野 光寿*4

要旨： 設計基準強度 70~80N/mm² 相当のコンクリートに関して、粗骨材、水セメント比およびポリプロピレン短繊維の混入の有無が鉄筋コンクリート造柱の耐火性に及ぼす影響を実験的に把握するとともに、柱の温度性状と構造挙動を解析的に検討した。石灰岩砕石と硬質砂岩砕石を使用した柱の荷重加熱実験を実施した結果、粗骨材種類による耐火性の差異は小さいことが把握された。また、数値解析によって、高強度コンクリートの遷移クリープひずみ量が普通強度コンクリートよりも大きいことが確認された。

キーワード： 鉄筋コンクリート造柱, 高強度コンクリート, 石灰岩砕石, 耐火性, 爆裂, 熱応力変形解析

1. はじめに

設計基準強度 (以下, Fc) が 60N/mm² を超える高強度コンクリートは、火災時に爆裂する可能性が高い。この爆裂を抑制するためにコンクリートに適量のポリプロピレン短繊維 (以下, PP 短繊維と略す) を混入する技術が 2000 年に実用化されている¹⁾。当該技術では一般的に耐火度の高い硬質砂岩砕石等の粗骨材が使用されてきている。その一方で、近年は、Fc70~80N/mm² 相当のコンクリートが広く普及し、粗骨材に石灰岩砕石を使用することも多い。石灰岩砕石を用いた高強度鉄筋コンクリート造柱 (以下, RC 造柱と略す) に関する耐火実験^{例えは 2)} はなされているが、未だ報告数は少ないのが現状である。

本検討では、上述の背景を踏まえて、Fc70~80N/mm² 相当のコンクリートに着目し、粗骨材、水セメント比、PP 短繊維混入の有無が RC 造柱の耐火性能 (爆裂性状、非損傷性 (荷重支持性能)) に及ぼす影響を実験的に把握するとともに、RC 造柱の温度性状と構造挙動に関する数値解析を行い、解析的予測の可能性について検討することを目的とした。なお、本検討の一部は既報³⁾で報告している。

2. 荷重加熱実験

2.1 試験体

(1) コンクリートの使用材料と調査

本検討では、東京・神奈川・千葉において高強度コンクリートを製造するレディーミクストコンクリート工場から 21 工場を任意に抽出して、Fc70~80N/mm² 相当のコンクリートに関する材料と調査を調査した。この調査結果を参考にして、粗骨材種類と水セメント比ならびに PP 短繊維の混入の有無を実験パラメータとして決定した。コンクリートの使用材料を表-1 に、試験体種類・仕様等を表-2 に示す。

表-1 コンクリートの主な使用材料

材料	仕様	
セメント	中庸熟ポルトランドセメント 密度: 3.21g/cm ³	
粗骨材	G1	硬質砂岩 砕石 2005 (東京都青梅市成木) 絶乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:0.53%
	G2	石灰岩 砕石 2005 (栃木県佐野市金沢町) 絶乾密度:2.70g/cm ³ , 吸水率:0.80%
	G3	石灰岩 砕石 2005 (栃木県佐野市仙波町) 絶乾密度:2.66g/cm ³ , 吸水率:0.96%
PP 短繊維	径 0.05mm, 長さ 10mm, 密度: 0.91g/cm ³	
その他	細骨材・混和剤等はコンクリート製造工場による	

表-2 試験体の種類とコンクリートの仕様

試験体名	水セメント比 (%)	粗骨材種類	PP 混入率 (vol%)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	含水率*1 (%)	水分率*2 (%)
				フレッシュ時	材齢 28 日 (標準養生)	耐火実験時 (封緘養生)	耐火実験時 (封緘養生)	耐火実験時 (封緘養生)	耐火実験時 (試験体面)
23.5-G2-0.1	23.5	G2	0.1	2.4	118.0	120.6	48.0	4.06	未測定
23.5-G3-0.1	23.5	G3	0.1	2.5	115.3	123.6	48.2	4.18	未測定
25.0-G1-0.0	25.0	G1	0.0	1.4	106.8	125.5	44.4	3.98	5.3
25.0-G2-0.0	25.0	G2	0.0	2.5	108.0	121.5	48.7	4.12	4.9
27.0-G3-0.0	27.0	G3	0.0	1.1	95.0	122.4	48.8	4.14	5.0

*1 現場封緘養生供試体 (φ10×20cm) 3 体の乾燥前質量と 105℃乾燥後質量から求めた値の平均値

*2 コンクリート・モルタル水分計を用いて、柱試験体の 4 側面の各中央で 1 点ずつ測定した値の平均値

*1 清水建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術戦略室 博士 (工学) (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 (正会員)

*4 清水建設 (株) 生産技術本部

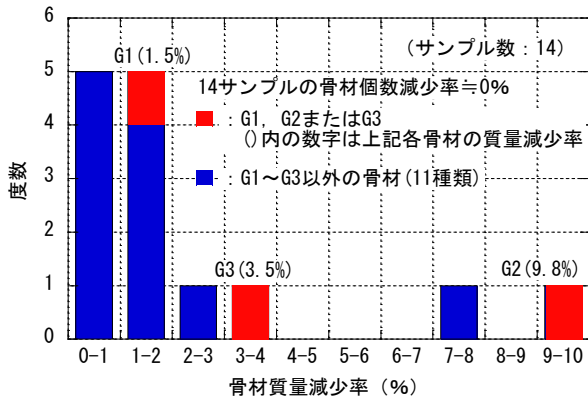


図-1 14 サンプルの耐火度試験結果（骨材質量減少率）

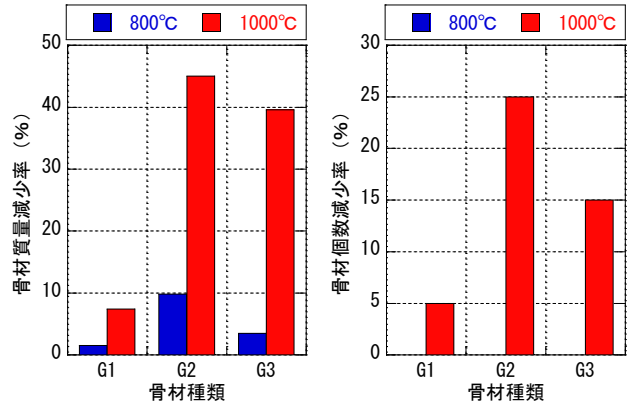


図-2 試験体を使用する粗骨材の耐火度試験結果

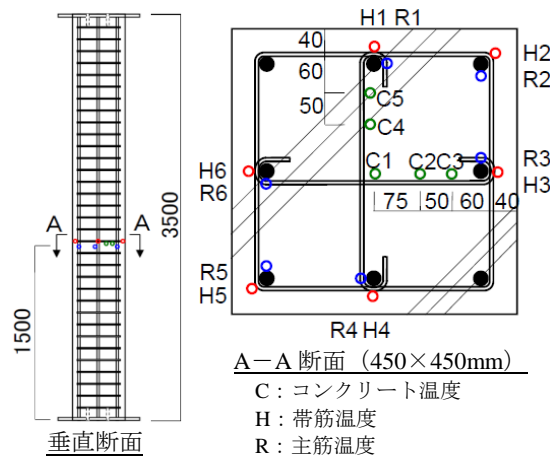


図-3 試験体

試験体を使用する粗骨材は、調査した工場で使用されていた石灰岩砕石および耐火性が高い骨材としてこれまで主に使用してきた硬質砂岩砕石に対して粗骨材の耐火度試験⁴⁾を実施して決定した。耐火度試験は、粗骨材を800℃で30分間加熱して骨材質量減少率と骨材個数減少率を求めるものであり、試験結果を図-1に示す。試験体を使用する骨材は、硬質砂岩砕石(G1)、耐火度が低い(骨材質量減少率が大きい)石灰岩砕石(G2)、および調査した工場の中で最も多く使用されている石灰岩砕石(G3)の3種類とした。なお、G1、G2、G3については1000℃・60分加熱に対する耐火度も調べた。800℃・30分と併せて図-2に試験結果を示す。1000℃で加熱されると骨材個数減少率・骨材質量減少率がG1<G3<G2の順となって差異が明確に現れた。石灰岩の炭酸カルシウムの分解が大きく影響しているものと考えられる。

水セメント比は調査結果をもとにFc80相当として23.5%、Fc70相当として25.0%と27.0%の合計3水準を設定し、3水準中最も低い水セメント比23.5%のコンクリートについてはPP短繊維を0.1vol%混入することとした。

試験体は5種類で各種類1体ずつとした。試験体名は水セメント比・粗骨材種類・PP短繊維混入率を示す表記とした。表-2に示すように耐火実験時におけるコンクリートの圧縮強度(現場封緘養生供試体)は120.6~

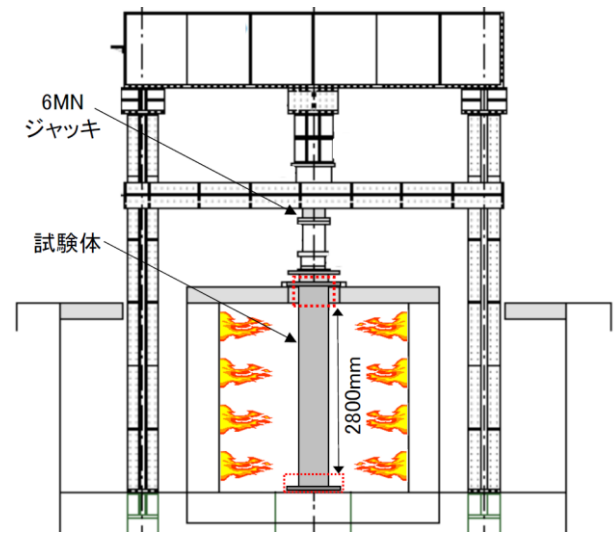


図-4 実験装置

125.5N/mm²の範囲であり、含水率(現場封緘養生供試体)は3.98~4.18wt%の範囲であった。PP短繊維無混入試験体に関しては、コンクリート・モルタル水分計で表層の水分率を測定したが、含水率との相関は見られなかった。

(2) 試験体

試験体の形状・寸法および温度測定位置を図-3に示す。断面450mm×450mm、高さ3,500mm、帯筋に対するかぶり厚さは40mmとした。主筋は8-D19(SD345、降伏点:391.4N/mm²、主筋比:1.13%)、帯筋はD10@100(SD295A、降伏点:331.3N/mm²、帯筋比:0.47%)とした。鉄筋とコンクリート内部に熱電対を取り付けた。試験体は、コンクリートを打設して脱型後、実験実施までは雨等の影響を受けない屋外で養生した。耐火実験はコンクリートの材齢が約1年9~11カ月の間に実施した。

2.2 実験方法

(1) 実験装置および载荷荷重

実験装置を図-4に示す。実験装置は加熱炉と载荷フレームで構成される。試験体の上下端には球座を設置し、6MNジャッキによって中心軸圧縮力を作用させた。荷重は、設計基準強度と部材断面積の積を3で除して算出した長期許容圧縮力(軸力比0.33)とし、水セメント比

25.0%と27.0% (Fc70相当) のコンクリートで4,725kN、水セメント比23.5%で (Fc80相当) のコンクリートで5,400kNとした。試験体への荷重は加熱に先立って行い、加熱中および加熱終了後12時間まで荷重を一定に保持した。加熱中に試験体が崩壊 (荷重支持能力を喪失) した場合には、その時点で除荷した。

(2) 加熱方法

加熱はISO834に規定される標準加熱温度曲線に準じた最長4時間の加熱とし、加熱終了後は加熱炉内にて12時間冷却した。加熱中に試験体が崩壊した場合には、その時点で加熱を中止した。試験体の上下端は、載荷治具等への熱影響を抑制するためにセラミックファイバープランケットで被覆した。試験体の有効加熱範囲は2,800mmとした。

(3) 測定・観察項目

炉内温度、試験体温度、荷重および試験体の軸方向変位を測定するとともに、試験体の状況を目視と耐熱カメラ映像によって観察した。

2.3 実験結果

(1) 概要

実験結果の概要を表-3に実験後の試験体の状況を写真-1に示す。PP短繊維無混入試験体では、加熱開始後約10~30分に連続的な爆裂が発生して鉄筋が露出し、加熱開始後135~173分の間に脆性的に圧縮破壊して崩壊に至った。崩壊時間は27.0-G3-0.0が若干早かったが、25.0-G1-0.0と25.0-G2-0.0では大差がなかった。爆裂性状に大きな差異が生じなかったのは、爆裂が終了する30分時の炉内温度は約840℃であり、骨材の耐火度の差異が明確に現れる1000℃に達していないことが一因として考えられる。

一方、PP短繊維混入試験体では、粗骨材の種類に関係なく、加熱開始後約10~20分に軽微な爆裂が生じただけで鉄筋の露出はなく、実験終了時においても荷重支持能力を保持しており、4時間耐火の性能が確認された。

(2) 温度測定結果

図-5に代表例として23.5-G2-0.1と25.0-G2-0.0の温度測定結果および後述の温度解析結果を示す。

23.5-G2-0.1の帯筋の最高温度の平均値は隅角部：722℃、側面部：519℃、主筋の最高温度の平均値は隅角部：641℃、側面部：453℃であり、帯筋と主筋の最高温度の差は70~80℃程度であった。コンクリートの最高温度の平均値は深さ150mmで349℃であり、深さ225mm (断面中心) で344℃であった。深さ150mmと225mmの差は5℃程度で大差がなかった。

25.0-G2-0.0の帯筋と主筋の温度は、爆裂による断面欠損の影響で23.5-G2-0.1よりも明らかに高くなっており、崩壊時における温度の平均値は帯筋で隅角部：1096℃、側面部：896℃であり、主筋で隅角部：996℃、側面部：712℃であった。帯筋と主筋の温度が加熱中止直後から低下しており、爆裂によって帯筋と主筋が炉内に露出していたことを裏付けている。コンクリートにあっては深さ150mmと225mm (断面中心) の温度が崩壊時に急激な上昇を示し、深さ100mmと概ね同等な温度性状を呈していることから、柱が圧縮破壊したことによって柱内部まで炉内の高温ガスが侵入した可能性が考えられる。

(3) 鉛直変位測定結果

図-6に鉛直変位 (加熱開始時の変位を0mmとした) の測定結果および後述の解析結果を併せて示す。

PP短繊維混入試験体では加熱開始後120分までは膨張方向の変位を示し、その後収縮方向の変位に転じた。加熱終了後の冷却期間において変位-時間関係の勾配は緩やかになっているが、960分 (加熱終了後720分) においても収縮変位が増加する傾向が認められる。

一方、加熱開始後10~30分の間に爆裂を生じたPP短繊維無混入試験体では、加熱初期の膨張方向の変位は小さく、加熱開始後60分頃には収縮方向の変位に転じている。その後、脆性的な圧縮破壊を起こして崩壊に至った。

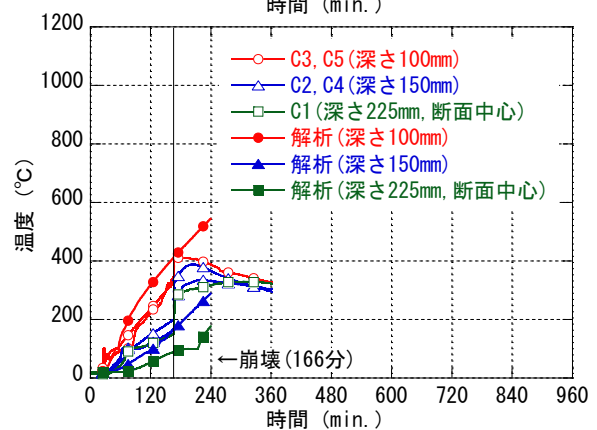
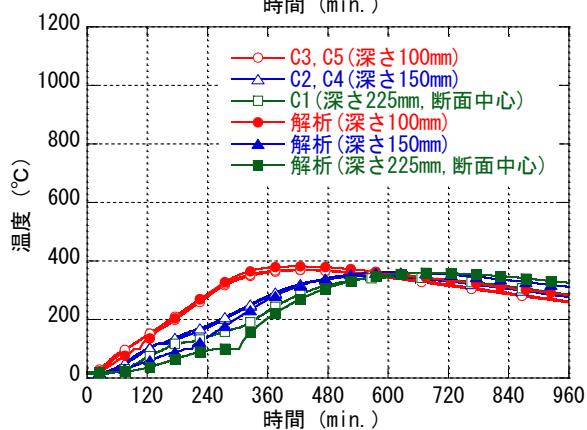
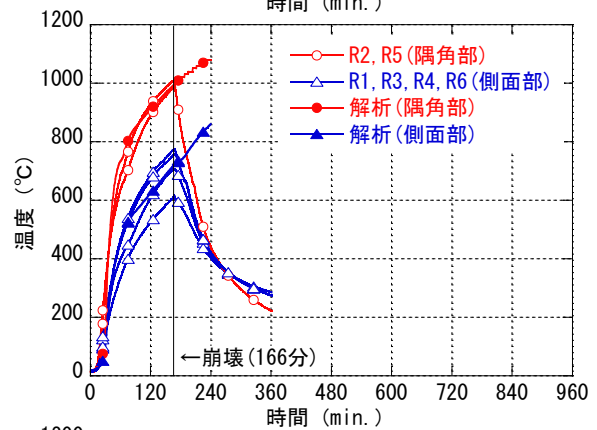
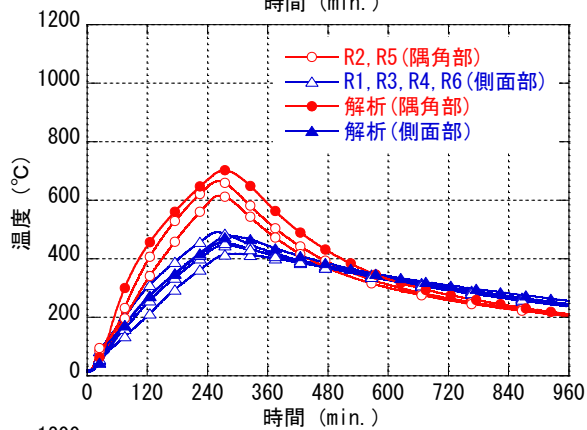
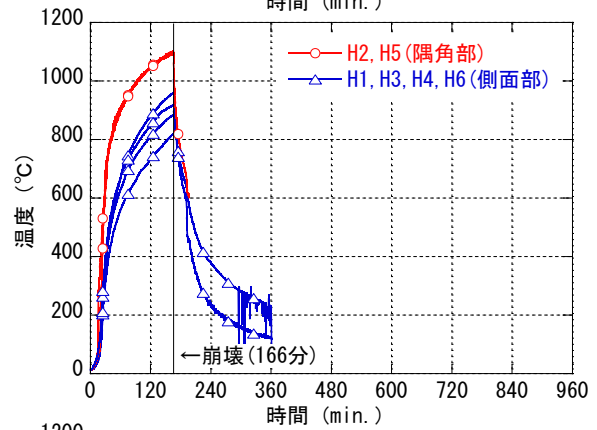
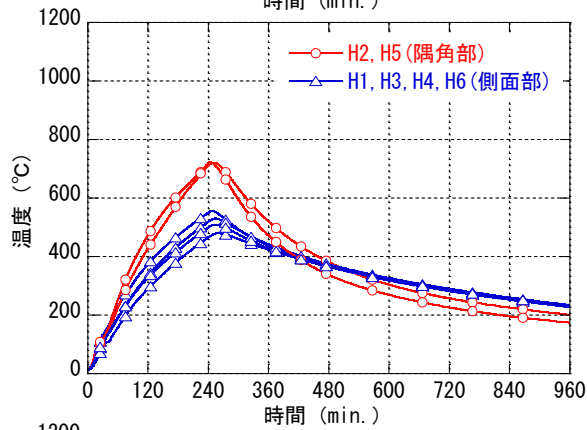
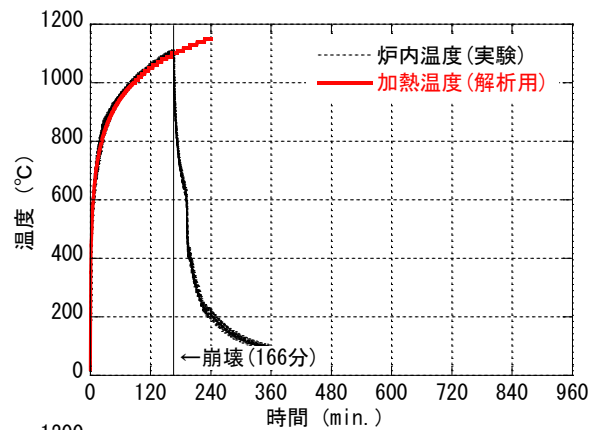
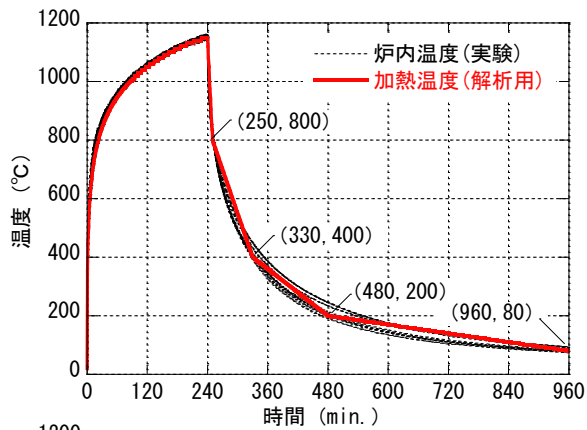
PP短繊維無混入試験体3体の変位挙動で骨材種類の違

表-3 実験結果概要

試験体名	崩壊時間 (分)	爆裂状況
23.5-G2-0.1	崩壊せず	・0~20分：散発的に爆裂発生 ・表層剥離：上下2箇所(鉄筋露出なし) 上部剥離：L50×W20cm、深さ2cm程度 下部剥離：L70×W10cm、深さ1cm程度
23.5-G3-0.1	崩壊せず	・7,9分：散発的に爆裂発生 ・表層剥離：上下2箇所(鉄筋露出なし) 上部剥離：L50×W20cm、深さ1cm程度 下部剥離：L50×W20cm、深さ1cm程度
25.0-G1-0.0	173	・8.5~30.0分：連続的に爆裂発生 ・爆裂によって主筋露出
25.0-G2-0.0	166	・9.5~28.5分：連続的に爆裂発生 ・爆裂によって主筋露出
27.0-G3-0.0	135	・6.5~30.0分：連続的に爆裂発生 ・爆裂によって主筋露出



写真-1 実験後の試験体の状況



【23.5-G2-0.1】

【25.0-G2-0.0】

図-5 部材温度の実験結果と解析結果（上から、炉内温度・帯筋温度・主筋温度・コンクリート温度）

いによる大差がないこと、およびPP短繊維混入試験体2体の変位挙動で骨材種類の違いによる大差がないことについては、主筋よりも内側のコンクリート温度が隅角部

を除けば800°C以下であり、骨材の耐火度に明確な差異を生じる1000°Cには達していないことが一因として考えられる。

3. RC 造柱試験体の変形挙動解析

3.1 解析方法

柱の変形挙動解析では、既報⁵⁾と同等なコンクリートと鋼材の高温時熱特性・力学特性モデルを用い、解析手法も既報⁵⁾と同様に部材温度解析と熱応力変形解析による一方向連成解析とした。熱応力変形解析では、既報⁵⁾で報告した遷移クリープひずみのコンクリートの昇温速度に対する依存性を考慮し、昇温速度が 7.5°C/min を超えた場合の遷移クリープひずみの発生量を低減した。なお、PP 短繊維の影響については十分な知見が得られていないのが現状であり、本検討における部材温度解析と熱応力変形解析では PP 短繊維は考慮しないこととした。

3.2 解析内容

(1) 解析モデル

解析における部材断面モデルを図-7 に示す。部材断面の対称性を考慮して解析断面は 1/4 断面とした。1/4 断面の一边は 225mm であり、断面の縦横をそれぞれ 22 等分した。鉄筋は主筋のみを断面モデルに組み込み、帯筋は無視した。実験時の柱の有効加熱高さは 2,800mm であったが、柱頭・柱脚を被覆しても被覆部分の温度上昇を抑えることは困難であり、その影響を考慮するため熱応力変形解析における柱高さは 3,000mm を仮定した。

(2) 爆裂による断面欠損

加熱開始後 10~30 分の間に爆裂を生じて主筋が露出した試験体 (Fc70 相当) の解析は、主筋の被りコンクリート約 50mm が加熱開始後 10~30 分の間に 2.5mm/min の速さで欠損するものとして爆裂をモデル化した。具体的には表層第 1 層~第 5 層の要素を 14, 18, 22, 26, 30 分に消失させて部材温度解析と熱応力変形解析を行った。

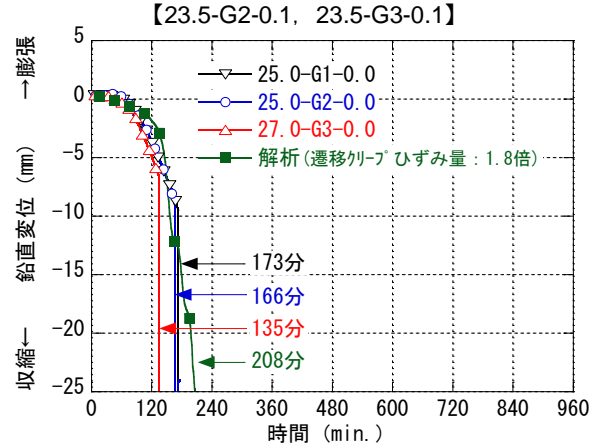
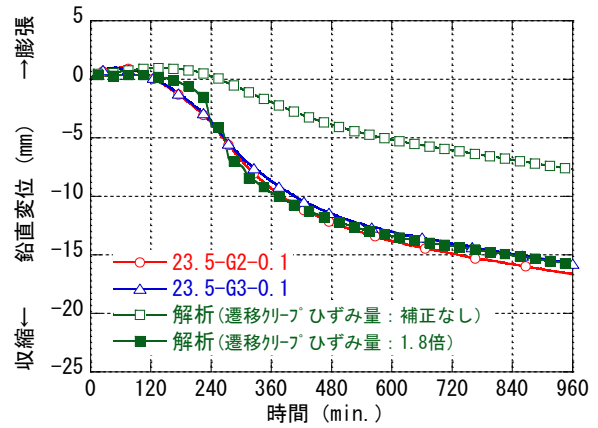
3.3 解析結果

(1) 温度解析結果

解析結果を前掲の図-5 に示し、加熱開始後 10, 20, 30 分の 1/4 断面の温度分布を図-8 に示す。解析結果は実験結果と概ね一致した。断面中心のコンクリート温度は実験よりも解析の方が低く、本解析では断面内の水分移動や水蒸気の移動を考慮していないことが影響していると考えられる。温度分布図からは爆裂が生じると低温のコンクリート部分が露出するため、爆裂終了までコンクリート表面が急激な熱衝撃を受けることがわかる。

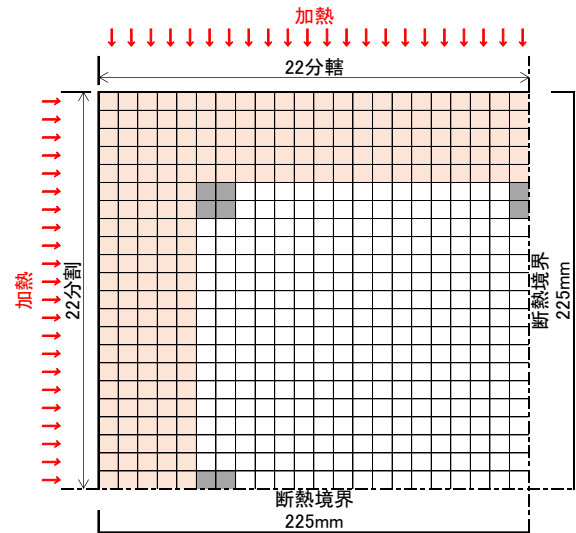
(2) 熱応力変形解析結果

鉛直変位の経時変化を前掲の図-6 に示すとともに、加熱開始後 10, 20, 30 分における 1/4 断面の応力レベル (=発生応力/残存強度) 分布を図-8 に示す。解析の結果、鉛直変位に関して実験結果と解析結果 (図-6 上図、補正なし) に大きな差が生じたため、3.1 で述べた方法で計算される遷移クリープひずみ量に補正倍率を掛けて鉛直変位量の変化を把握するパラメータスタディを行



【23.5-G2-0.1, 23.5-G3-0.1】
【25.0-G1-0.0, 25.0-G2-0.0, 27.0-G3-0.0】

図-6 柱の鉛直変位の実験結果と解析結果



※グレーの網掛けは鉄筋を示し、オレンジ色の網掛けは爆裂による断面欠損範囲を示す。

図-7 部材断面の要素分割 (1/4 断面)

った。その結果、遷移クリープひずみ量を 1.8 倍すると実験結果と解析結果が概ね一致した。高強度コンクリートの高温圧縮状態下における収縮方向の全体ひずみ (遷移クリープひずみ成分も含む) は普通強度コンクリートよりも大きくなるのが既往の研究⁶⁾により報告されている。本検討で使用したコンクリートモデルは、普通強度コンクリートを対象にしたものであるため、高強度コ

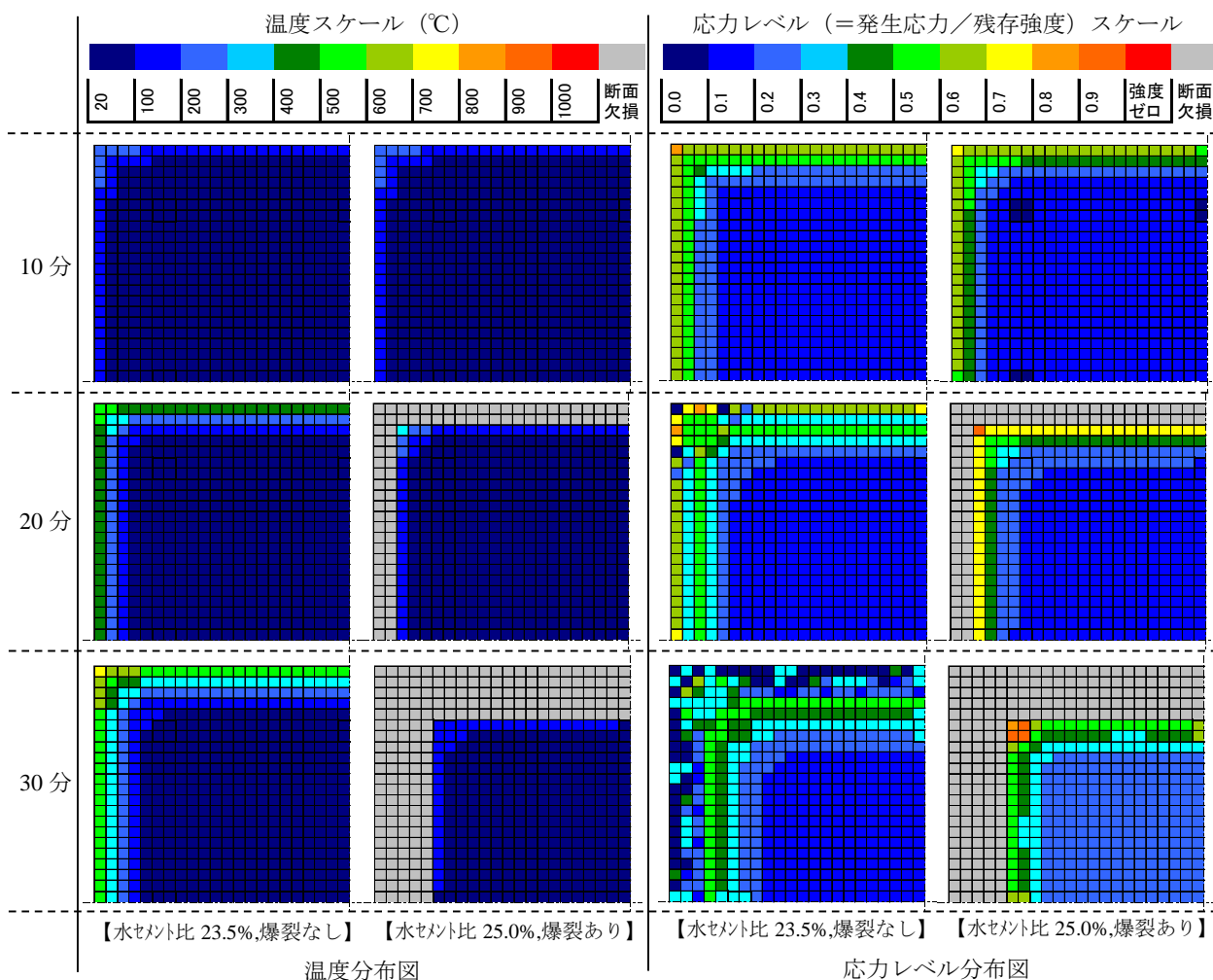


図-8 解析断面 (1/4 断面) の温度分布と応力レベル分布 (遷移クリープひずみ量 1.8 倍)

ンクリートの遷移クリープひずみを小さく評価する可能性が高く、今後、改良する必要がある。応力レベル分布図から、爆裂なしの場合、表層コンクリートの30分時の応力レベルが概ね0.1未満となっている。これは、加熱初期の温度上昇と高圧縮力の負担によって表層コンクリートの遷移クリープひずみが増大するとともに、内部のコンクリートの熱膨張による応力緩和が生じたためである。爆裂ありの場合、表層コンクリートの応力レベルが30分<10分<20分の順に大きいが、コンクリートの圧壊が生じる応力レベルには達していない。爆裂は熱応力（高圧縮力）と水蒸気圧（コンクリートを膨張させる力として、疑似的な引張力と考えられる）の複合作用で生じる可能性が推察される。

4. まとめ

石灰岩砕石と硬質砂岩砕石を使用した高強度コンクリートで製作したRC造柱の載荷加熱実験を実施した結果、27.0-G3-0.0を除いて、粗骨材の種類による耐火性能の差異は小さいことが把握された。また、数値解析によって、高強度コンクリートの遷移クリープひずみ量が普通強度コンクリートよりも大きいことが確認された。

参考文献

- 1) 森田武, 西田朗, 刑部章, 河内二郎: 耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工, コンクリート工学, Vol.39, No.11, pp.18-23, 2001.11
- 2) 石灰石粗骨材を用いた高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究 (その1~5), 2015年度日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp.53-62, 2015.9
- 3) 森田武 他: 高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する実験的検討, 平成26年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.118-119, 2014.5
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.134-136, 1991
- 5) 森田武, 山下平祐, 別府万寿博, 鈴木誠: 鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁の火災時における変形挙動に関する検討, コンクリート工学年次大会論文集, vol.37, No.1, pp.1009-1014, 2015.7
- 6) 豊田康二 他: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究 その2 一定応力下において温度変化を伴う高温圧縮実験, 構造工学論文集, vol.50B, pp.9-14, 2004.3